Модель динамического уплотнения энергии

Профессор N1KURA · версия 1.1.5 · дата: 2025-08-31 · статус: preprint · https://t.me/N1KURA

НФМПН — «Новые феноменологические модели Профессора Никуры».

Аннотация Введение Предыстория Цель Формула Метрика σ_inf Область применимости Вывод Прогнозы Эксперимент Ограничения Пример Глоссарий Воспроизводимость Оригинальность Математическая модель

Мини-шаблон (НФМПН)

Модель: динамического уплотнения энергии (DCE)

Идея: локальная плотность энергии в материале возрастает при наличии *пространственной объёмной плотности информации* в проходящем сигнале и/или в структуре среды.

Что даст: • самоуплотняющиеся оптические/акустические буферы • энергоёмкие пассивные узлы для фотонных/квантовых чипов • усиление активного слоя солнечных элементов без роста входной мощности.

Проверка: стенд CW/импульсного лазера → модулятор → фотонный многослой/метаматериал; метрики — локальная $\rho_E(x)$, время удержания τ_{hold}, коэффициент η_E.

Аннотация

Предлагается прикладной принцип (модель DCE), связывающий локальную плотность энергии ρ_E^{loc} с пространственной информационной упорядоченностью $\sigma_{\text{inf}}(x)$ в материале. Вводится *измеримая* метрика σ_{inf} через параметры сигнала и структуры, что переводит модель из концептуального уровня в инженерный протокол проектирования и верификации.

Новизна: в отличие от описаний через Q-фактор, slow-light и локализацию, здесь вводится измеримая метрика σ_{inf}, извлекаемая из параметров модуляции и структурной метрики среды, что позволяет *предсказывать* прирост ρ_E^{loc} до эксперимента и на этапе тюнинга структуры.

1. Введение

Обоснование. Связь «информация ↔ энергия/энтропия» [2] известна. Здесь формулируется материаловедный эффект: структурированность по координате повышает локальную энергоёмкость участка без увеличения средней входной мощности.

Почему этого не хватало: Q-фактор и slow-light хорошо объясняют уже наблюдаемый рост τ_{hold} и ρ_E, но не дают универсальной *входной* метрики, связывающей параметры сигнала и упорядоченность среды с величиной энергетического эффекта. Введённая нами σ_{inf} закрывает этот разрыв и выступает предсказательным параметром проектирования.

Цель. Дать рабочую формулу, определить наблюдаемые параметры η_E, κ_I и воспроизводимый протокол измерения σ_{inf}.

2. Предыстория

- Фотонные кристаллы, медленный свет [6], локальные резонансы [11] (рост времени удержания и энергетической плотности).
- Термодинамика информации (принцип Ландауэра [1] и др. [4]) — связь информации с работой и энтропией; здесь — иной фокус: прямая феноменология «структура → энергоёмкость» в фиксированной среде.

3. Постановка цели

Сформулировать $\rho_E^{\text{loc}}(\sigma_{\text{inf}})$, ввести измеримую метрику σ_{inf}, определить область применимости и протокол верификации.

4. Формулировка (Elevation → Formalization)

$$\boxed{\rho_E^{\text{loc}}(x) = \rho_E^0 + \eta_E\left[\frac{R(x)}{v_g}\,\Phi(x)\right]^{\kappa_I}, \quad \kappa_I > 0}$$

Словами: локальная плотность энергии равна базовой ρ_E^0 плюс вклад, зависящий степенно от *объёмной плотности информации* $\sigma_{\text{inf}}(x) \equiv \dfrac{R(x)}{v_g}\,\Phi(x)$.

Обозначения и единицы:

- $\rho_E^{\text{loc}}, \rho_E^0$ — Дж·м$^{-3}$.
- $R(x)$ — локальная скорость передачи информации (бит·с$^{-1}$); в эксперименте оценивается через параметры модуляции, см. §5.
- v_g — групповая скорость (м·с$^{-1}$).
- $\Phi(x)$ — *структурная метрика* (м$^{-2}$), введённая так, чтобы σ_{inf} имела размерность бит·м$^{-3}$.
- η_E — коэффициент преобразования (Дж·м$^{-3}$·бит$^{-\kappa_I}$·м$^{3\kappa_I}$).
- κ_I — показатель чувствительности среды (безразмерный).

5. Метрика σ_{inf} (измеримая)

Определение. Вводим

$$\sigma_{\text{inf}}(x) \equiv \frac{R(x)}{v_g}\,\Phi(x),$$

где составляющие измеряются напрямую на стенде.

Сигнальная часть. Для оптической модуляции практичная оценка:

$$R(x) \approx Bm^2,$$

где B — полоса модуляции (Гц), m — относительная глубина модуляции (0–1). Такая аппроксимация учитывает «информационное наполнение» без декодирования битового потока.

Примечание: $R \approx Bm^2$ используется как *инженерная proxy-оценка* информационного наполнения без декодирования; строгие меры (Шеннон/взаимная информация) здесь не подменяются.

Структурная часть. Пусть

$$\Phi(x) \equiv \frac{\Xi_{\text{struct}}(x)}{A_{\text{eff}}(x)} \quad (\text{м}^{-2}),$$

где A_{eff} — эффективная модальная площадь, а Ξ_{struct} — безразмерный индекс упорядоченности. Примеры выбора Ξ_{struct}:

- Многослой/ФК: $\Xi_{\text{struct}} = \dfrac{\Delta n}{\langle n\rangle}\cdot D_f$ (контраст показателя преломления × фрактальная размерность последовательности толщин).
- Нанорешётки: $\Xi_{\text{struct}} = \text{Var}(\Lambda)/\langle\Lambda\rangle$ или индекс апериодичности по спектру Фурье [17].
- Квазикристаллы: доля квазипериодических компонент в нормированном спектре (0–1).

Примечание: A_{eff} извлекается из профиля моды (NFA/НС-скан, численный решатель); обеспечивает размерность Φ как м$^{-2}$.

Среда	Индекс Ξ_{struct}	Комментарий
Многослой/ФК	$\dfrac{\Delta n}{\langle n\rangle}\cdot D_f$	Контраст n × фрактальная размерность толщин
Нанорешётки	$\text{Var}(\Lambda)/\langle\Lambda\rangle$	Дисперсия шага/апериодичность по Фурье
Квазикристаллы	Доля квазипериодических компонент (0–1)	По нормированному спектру
Плазмонные направляющие	$\text{Var}(t_{\text{gap}})/\langle t_{\text{gap}}\rangle$	Флуктуации зазора/асимметрия
Акустические метаматериалы	Индекс пористо-апертурной упорядоченности	По изображению/КИИ

Итог: σ_{inf} выражается через B, m, v_g, A_{eff} и один выбранный индекс Ξ_{struct} — все величины доступны измерению/моделированию.

6. Область применимости

- Среды: фотонные многослои и волноводы, плазмонные направляющие, акустические метаматериалы.
- Режим: слабонелинейный, стационарная температура (термоконтроль обязателен).
- Ограничения: при насыщении/перегреве возможен переход к суб-линейному режиму (эффективное $\kappa_I\downarrow$).

7. Эскиз вывода

1. (A1) Рост упорядоченности усиливает локализацию мод [11](ловушки Q/V, медленные режимы).
2. (A2) Локальная задержка/запирание повышает τ_{hold} и, как следствие, ρ_E^{loc}.
3. (A3) Для фиксированной средней мощности вклад монотонно растёт с σ_{inf}.

Феноменологически это записывается в виде основной формулы §4.

8. Прогнозы и проверяемые следствия

- П1. При равной средней мощности переход от случайной к структурированной модуляции (больший Ξ_{struct}) даёт рост ρ_E^{loc} и хвостов τ_{hold}.
- П2. κ_I чувствителен к дисперсии слоёв/решёток и меняется при перенастройке структуры.
- П3. Существует порог σ_{inf}, после которого рост становится нелинейным (локальные резонансы).

9. Мини-эксперимент

Стенд: лазер (CW/фс–нс) → модулятор (AMP/PH) → фотонный многослой/метаматериал → детекторы (TRPL/спектр/болометр).

Метрики: $\rho_E^{\text{loc}}(x)$ (по люминесценции/поглощению), τ_{hold}, v_g, A_{eff}, B, m, Ξ_{struct}.

Протокол: серии при равной мощности: (R) случайная, (P) периодическая, (S) структурированная; фит η_E, κ_I; критерий $R^2 \geq 0.9$.

Лазер (CW/имп.) → Модулятор (EOM/AOM) → Многослой/метаматериал → Детекторы (TRPL/спектр/болометр)

Примечание: EOM — электрооптический модулятор; AOM — акустооптический модулятор; TRPL — time-resolved photoluminescence (временно-разрешённая фотолюминесценция).

10. Ограничения/ловушки

- Паразитный нагрев может имитировать рост ρ_E — обязателен термоконтроль и нормировка по мощности.
- Единая методика для A_{eff} и Ξ_{struct} внутри одной серии — иначе кросс-артефакты.
- Контроль дисперсии/групповой задержки: фиксировать спектр при сравнении режимов.
- Шумы модуляции и джиттер: влияют на оценку B и эффективного m; следует указывать SNR и метод усреднения.
- Неоднородный нагрев/дрейф: меняет A_{eff} и локальные показатели преломления; фиксировать температурную карту и лимиты выбросов.

11. Численный пример

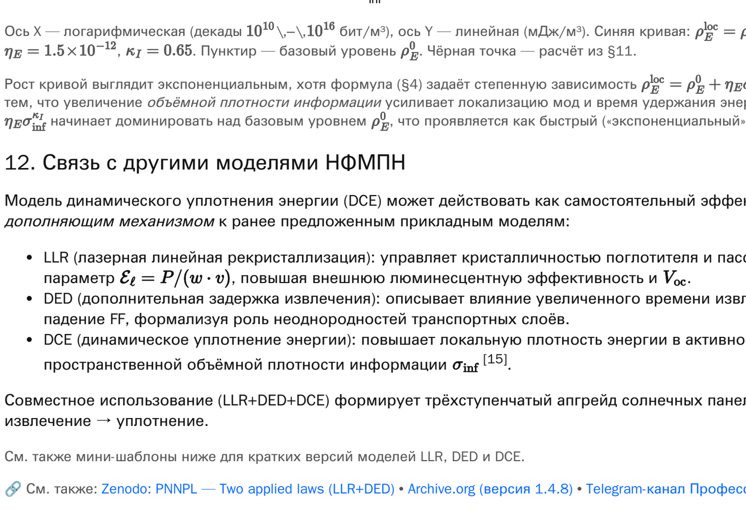
Условия примера: $\lambda = 1550$ нм, входная мощность $P = 10$ мВт. Параметры $\rho_E^0, \eta_E, \kappa_I$ заданы для иллюстрации порядков и процедуры фита.

Дано: $B = 2$ ГГц, $m = 0.7 \Rightarrow R \approx Bm^2 = 9.8\times10^8$ бит/с; $v_g = 1.8\times10^8$ м/с $\Rightarrow \frac{R}{v_g} \approx 5.444$ бит/м. Для многослоя: $\Delta n = 0.25$, $\langle n\rangle = 1.9$, $D_f = 1.35 \Rightarrow \Xi_{\text{struct}} = \frac{\Delta n}{\langle n\rangle}D_f \approx 0.1776$. Пусть $A_{\text{eff}} = 5\times10^{-14}$ м$^2 \Rightarrow \Phi = \Xi_{\text{struct}}/A_{\text{eff}} \approx 3.5526\times10^{12}$ м$^{-2}$. Тогда $\sigma_{\text{inf}} \approx 1.9342\times10^{13}$ бит/м^3.

$$\rho_E^{\text{loc}} = \rho_E^0 + \eta_E[\sigma_{\text{inf}}]^{\kappa_I}, \quad \rho_E^0 = 1.2\,\text{мДж/м}^3,\ \eta_E = 1.5\times10^{-12},\ \kappa_I = 0.65.$$
$$\Rightarrow \quad \Delta\rho_E \approx 0.649\,\text{мДж/м}^3, \quad \rho_E^{\text{loc}} \approx 1.849\,\text{мДж/м}^3 \ (+54\%).$$

Числа приведены для иллюстрации порядков и извлечения η_E, κ_I; в реальном образце они зависят от структуры.

Порядок ρ_E^0 (~мДж/м³) соответствует типичным энергиям в фотонных резонаторах при λ≈1550 нм и входной мощности десятки мВт [7].



Ось X — логарифмическая (декады 10^{10}\,–\,10^{16} бит/м³), ось Y — линейная (мДж/м³). Синяя кривая: $\rho_E^{\text{loc}} = \rho_E^0 + \eta_E\sigma_{\text{inf}}^{\kappa_I}$ при $\rho_E^0 = 1.2$, $\eta_E = 1.5\times10^{-12}$, $\kappa_I = 0.65$. Пунктир — базовый уровень ρ_E^0. Чёрная точка — расчёт из §11.

Рост кривой выглядит экспоненциальным, хотя формула (§4) задаёт степенную зависимость $\rho_E^{\text{loc}} = \rho_E^0 + \eta_E\sigma_{\text{inf}}^{\kappa_I}$. Такой характер связан с тем, что увеличение *объёмной плотности информации* усиливает локализацию мод и время удержания энергии. При больших σ_{inf} вклад $\eta_E\sigma_{\text{inf}}^{\kappa_I}$ начинает доминировать над базовым уровнем ρ_E^0, что проявляется как быстрый («экспоненциальный») рост на линейной шкале Y.

12. Связь с другими моделями НФМПН

Модель динамического уплотнения энергии (DCE) может действовать как самостоятельный эффект, но также является *дополняющим механизмом* к ранее предложенным прикладным моделям:

- LLR (лазерная линейная рекристаллизация): управляет кристалличностью поглотителя и пассивацией дефектов через параметр $\mathcal{E}_\ell = P/(w\cdot v)$, повышая внешнюю люминесцентную эффективность и V_{oc}.
- DED (дополнительная задержка извлечения): описывает влияние увеличенного времени извлечения носителей τ_{ext} на падение FF, формализуя роль неоднородностей транспортных слоёв.
- DCE (динамическое уплотнение энергии): повышает локальную плотность энергии в активном слое за счёт пространственной объёмной плотности информации σ_{inf} [15].

Совместное использование (LLR+DED+DCE) формирует трёхступенчатый апгрейд солнечных панелей: рекристаллизация → извлечение → уплотнение.

См. также мини-шаблоны ниже для кратких версий моделей LLR, DED и DCE.

🔗 См. также: Zenodo: PNNPL — Two applied laws (LLR+DED) • Archive.org (версия 1.4.8) • Telegram-канал Профессора NIKURA

Мини-шаблоны (НФМПН)

Модель LLR — лазерная линейная рекристаллизация
Идея: управляемая кристалличность и пассивация дефектов через энергетический параметр облучения.
Что даст: • рост внешней люминесцентной эффективности • ↑ Voc • стабилизация деградации.
Проверка: TRPL-карты, XRD/PL, вок/FF до/после обработки.

Модель DED — дополнительная задержка извлечения
Идея: увеличение τ_{ext} относительно t_{tr} понижает FF по квазилинейному закону.
Что даст: • диагностика транспортных слоёв • быстрый скрининг архитектур • предсказуемость FF.
Проверка: импеданс/TPC, зависимость FF от $\tau_{\text{ext}}/t_{\text{tr}}$ (серии устройств).

Модель DCE — динамическое уплотнение энергии
Идея: локальная плотность энергии растёт с объёмом плотности информации сигнала/среды.
Что даст: • самоуплотняющиеся пассивные буферы • энергоёмкие узлы фотоники/акустики • апгрейд активного слоя ФЭП без ↑ мощности.
Проверка: ρ_E^{loc}, τ_{hold}, извлечение η_E, κ_I из фитирования по метрике $\sigma_{\text{inf}} = \frac{R}{v_g}\frac{\Xi_{\text{struct}}}{A_{\text{eff}}}$.

12a. Методика расчёта индекса структурной упорядоченности Ξ_{struct}

Индекс $\Xi_{\text{struct}} \in [0,\infty)$ выбирается из списка ниже в зависимости от класса структуры. Он должен быть единообразен внутри одной серии экспериментов.

Многослой / фотонный кристалл

Определение. $\Xi_{\text{struct}} = \dfrac{\Delta n}{\langle n\rangle}D_f$, где $\Delta n = n_{\max} - n_{\min}$, $\langle n\rangle$ — среднее по слоям, а D_f — фрактальная размерность профиля толщин.

Алгоритм (box-counting):

1. Нормируйте последовательность толщин $\{d_i\}_{i=1}^N$ на $d_{\min}$: $s_i = d_i/d_{\min}$.
2. Постройте «ломаную» по точкам (i, s_i), покрывайте шкалу по оси i равными ячейками размера ϵ.
3. Подсчитайте число занятых ячеек $N(\epsilon)$, найдите наклон на участке линейности: $D_f = -\dfrac{d\log N(\epsilon)}{d\log\epsilon}$.

Нанорешётки

Определение A (вариативность периода): $\Xi_{\text{struct}} = \dfrac{\text{Var}(\Lambda)}{\langle\Lambda\rangle}$.

Определение B (апериодичность по спектру): выполните Фурье-анализ массива; $\Xi_{\text{struct}} = 1 - \dfrac{P_{\text{fund}}}{\sum_k P_k}$, где P_{fund} — мощность главной гармоники.

Квазикристаллы / апериодические последовательности

Определение: $\Xi_{\text{struct}} = \dfrac{\sum_{k\in K_{\text{quasi}}}P_k}{\sum_k P_k}$, доля квази-периодических компонент в нормированном спектре (0–1).

Нормализация. Для сравнимости между образцами допускается линейное масштабирование $\Xi_{\text{struct}} \mapsto \Xi'_{\text{struct}} = \Xi_{\text{struct}}/\Xi_{\max}$ внутри серии (фиксируется в протоколе).

12b. Воспроизводимость (protocol)

1. Спектр и мощность входа: фиксировать среднюю мощность на образце (болометрия), логировать спектр.
2. Параметры модуляции: измерять B и m анализатором спектра; считать $R \approx Bm^2$.
3. Групповая скорость: измерять v_g по дифференциальной задержке: $\Delta t = t_{\text{sample}} - t_{\text{air}}$, $n_g = 1 + \dfrac{c\,\Delta t}{d}$, $v_g = \dfrac{c}{n_g}$.
4. Профиль моды: извлекать A_{eff} (численно/экспериментально); метод фиксировать единый для серии.
5. Индекс структуры: выбирать один вариант Ξ_{struct} из §12a и применять консистентно.
6. Термоконтроль: датчик температуры/ИК-камера; отбрасывать серии с дрейфом выше заданного порога.
7. Фит параметров: по рядам $\{\sigma_{\text{inf}}, \rho_E^{\text{loc}}\}$ определять η_E, κ_I методом МНК; критерий качества $R^2 \geq 0.9$.
8. Отчётность: публиковать сырые данные (CSV), описание кода подгонки и версию прошивки приборов.

12c. Размерностный анализ коэффициента η_E

Пусть σ_{inf} имеет размерность бит·м$^{-3}$. Тогда из $\rho_E^{\text{loc}} = \rho_E^0 + \eta_E\,\sigma_{\text{inf}}^{\kappa_I}$ следует

$$[\eta_E] = \text{Дж}\cdot\text{м}^{3\kappa_I - 3}\cdot\text{бит}^{-\kappa_I}.$$

При $\kappa_I = 1$ получаем $[\eta_E] = $ Дж/бит, что перекликается с предельной оценкой Ландауэра $k_BT\ln 2$ на бит (без отождествления эффектов, поскольку здесь нет операций измерения/стирания).

12d. Явные применения

- Фотонные кристаллы: буферизация данных и стабилизация световых импульсов без увеличения мощности.
- Акустические метаматериалы: создание компактных шумопоглощающих структур и пассивных акустических буферов.
- Солнечные элементы: повышение Voc и энергоёмкости активного слоя без роста входной мощности.
- Квантовые узлы: усиление хранения энергии в квазирезонансах для более стабильной работы квантовых устройств.

13. Краткая справка по оригинальности

Работа вводит измеримую входную метрику σ_{inf} и феноменологическую связь с ρ_E^{loc}, дополняя Q-фактор [6] /slow-light/локализацию [11]. До прямой экспериментальной верификации корректно позиционировать результат как прикладной принцип/модель; после прохождения протокола (§9) термин «закон» уместен в пределах области применимости (§6).

14. Литература и связь с исследованиями

1. R. Landauer, "Irreversibility and Heat Generation in the Computing Process," *IBM J. Res. Dev.*, vol. 5, pp. 183–191, 1961.
2. C. H. Bennett, "The thermodynamics of computation — a review," *Int. J. Theor. Phys.*, vol. 21, pp. 905–940, 1982.
3. T. Sagawa and M. Ueda, "Nonequilibrium thermodynamics of feedback control," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 104, p. 090602, 2010.
4. J. M. R. Parrondo, J. M. Horowitz, and T. Sagawa, "Thermodynamics of information," *Nat. Phys.*, vol. 11, pp. 131–139, 2015.
5. M. del Rio, J. Åberg, R. Renner, O. Dahlsten, and V. Vedral, "The thermodynamic meaning of negative entropy," *Nature*, vol. 474, pp. 61–63, 2011.
6. T. Baba, "Slow light in photonic crystals," *Nat. Photonics*, vol. 2, pp. 465–473, 2008.
7. M. Notomi, "Manipulating light with strongly modulated photonic crystals," *Rep. Prog. Phys.*, vol. 73, p. 096501, 2010.
8. L. V. Hau, S. E. Harris, Z. Dutton, and C. H. Behroozi, "Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas," *Nature*, vol. 397, pp. 594–598, 1999.
9. H. Yoshimi, K. Takeda, T. Oyama, and M. Notomi, "Demonstration of slow light in photonic crystal coupled waveguides," *Opt. Lett.*, vol. 45, pp. 2648–2651, 2020.
10. A. Kumar, Y. Liu, and T. F. Krauss, "Slow light engineering in coupled-cavity waveguides," *Nat. Commun.*, vol. 15, p. 3316, 2024.
11. C. W. Hsu, B. Zhen, A. D. Stone, J. D. Joannopoulos, and M. Soljačić, "Bound states in the continuum," *Nat. Rev. Mater.*, vol. 1, p. 16048, 2016.
12. F. Monticone and A. Alù, "Bound states in the continuum in photonics," *Rev. Mod. Phys.*, vol. 89, p. 045001, 2017.
13. S. I. Azzam *et al.*, "Observation of bound states in the continuum in dielectric metasurfaces," *Adv. Opt. Mater.*, vol. 9, p. 2001469, 2021.
14. G. Xu, Y. Li, Z. Guo, and S. Fan, "Ultrafast dynamics of quasi-BIC modes," *Ultrafast Science*, vol. 3, p. 0033, 2023.
15. A. Forbes, M. de Oliveira, and M. R. Dennis, "Structured light," *Nat. Photonics*, vol. 15, pp. 253–262, 2021.
16. C. He, X. Fang, Y. Li, and S. Zhang, "Roadmap on structured waves," *J. Opt.*, vol. 25, p. 073001, 2023.
17. J. Wang *et al.*, "Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing," *Nat. Photonics*, vol. 6, pp. 488–496, 2012.
18. V. Giovannetti, S. Lloyd, and L. Maccone, "Quantum limits to dynamical evolution," *Phys. Rev. A*, vol. 67, p. 052109, 2003.

Эти работы формируют фундамент (термодинамика информации, slow-light, BIC, структурированный свет). DCE вносит новый элемент — метрику объёмной плотности информации σ_{inf} как универсальный инструмент прогнозирования и оптимизации.

15. Протокол (детально) — Supplementary

Этот раздел дополняет §9 и §12b, фиксируя оборудование и шаги извлечения η_E и κ_I для конкретного образца. Ключ: единый протокол в серии.

Оборудование

- Источник: лазер (CW/импульсный) на рабочей длине волны, совместимый с модуляцией.
- Модулятор: EOM/AOM для управления полосой B и глубиной m.
- Образец: ФК/метаповерхность/многослой с известной геометрией.
- Детектирование: спектрометр; быстрый ФД (TOF); болометр; NF/конфокал для карт ρ_E^{loc} и оценки A_{eff}.
- Термоконтроль: ИК-камера/термопары.
- Контроль модуляции: анализатор спектра/осциллограф (верификация B, m).

Шаг 0 — Структурная метрика

Зафиксировать метод Ξ_{struct} (см. §12a) и A_{eff} — использовать неизменно в серии. Для многослоя: $\Xi_{\text{struct}} = \frac{\Delta n}{\langle n\rangle}D_f$; A_{eff} — из модового профиля.

Шаг 1 — Калибровка сигнала

1. Измерить входную мощность на образце (болометр).
2. Режимы: R (PRBS), P (период.), S (структурир.).
3. Измерить B и m; по умолчанию взять $R \approx Bm^2$.
   Альтернатива (Шеннон): при известной SNR: $R \approx B\log_2(1+\text{SNR})$. Важно: внутри одной серии использовать *одну* дефиницию R.

Шаг 2 — Групповая скорость (исправлено)

TOF-измерение дифференциальной задержки относительно воздуха той же длины: $\Delta t = t_{\text{sample}} - t_{\text{air}}$. Тогда групповой показатель $n_g = 1 + \dfrac{c\,\Delta t}{d}$, и $v_g = \dfrac{c}{n_g}$. (Если доступно абсолютное t_{sample}, допустимо $v_g = d/t_{\text{sample}}$.)

Шаг 3 — Эффективная площадь

По карте интенсивности $I(x,y)$: $A_{\text{eff}} = \dfrac{\left(\iint I\,dx\,dy\right)^2}{\iint I^2\,dx\,dy}$.

Шаг 4 — Локальная плотность энергии

- A. Люминесценция (калибровка обяз.): карты $\propto \rho_E^{\text{loc}}$.
- B. Локальный нагрев (кратковременно): $\Delta T(x,y) \propto \rho_E^{\text{loc}}(x,y)$.
- C. Зондирование (Керр): слабый зонд на другой λ → сдвиг показателя $\propto \rho_E^{\text{loc}}$.

Шаг 5 — Расчёт σ_{inf} и фит

$\sigma_{\text{inf}} = \dfrac{R}{v_g}\dfrac{\Xi_{\text{struct}}}{A_{\text{eff}}}$. Для каждой конфигурации берём $\Delta\rho_E = \rho_E^{\text{loc}} - \rho_E^0$ и в лог-масштабе: $\ln\Delta\rho_E = \ln\eta_E + \kappa_I\ln\sigma_{\text{inf}}$.
Качество: $R^2 \geq 0.9$, проверка остатков.

Бюджет неопределённости: ошибки в B, m (SNR, джиттер), v_g (временное разрешение), A_{eff} (калибровка), Ξ_{struct} (выбор методики).

16. Математическая модель

Базовая феноменология. $\rho_E^{\text{loc}} = \rho_E^0 + \eta_E\,[\sigma_{\text{inf}}]^{\kappa_I}$, где $\sigma_{\text{inf}} = \dfrac{R}{v_g}\dfrac{\Xi_{\text{struct}}}{A_{\text{eff}}}$. Для лабораторной модуляции по умолчанию берём $R \approx Bm^2$; вариант: $R \approx B\log_2(1+\text{SNR})$ при известной SNR.

16.1 Оценка параметров κ_I и η_E (без кода)

1. Для каждой конфигурации i измерить $B_i, m_i, v_{g,i}, \Xi_{\text{struct},i}, A_{\text{eff},i}, \rho_{E,i}^{\text{loc}}$.
2. Посчитать R_i (по выбранной дефиниции), $\Phi_i = \Xi_{\text{struct},i}/A_{\text{eff},i}$, затем $\sigma_{\text{inf},i} = (R_i/v_{g,i})\,\Phi_i$.
3. Определить $\Delta\rho_{E,i} = \rho_{E,i}^{\text{loc}} - \rho_E^0$ и перейти к лог-масштабу: $x_i = \ln\sigma_{\text{inf},i}$, $y_i = \ln\Delta\rho_{E,i}$.
4. Линейная регрессия $y = a + bx$ даёт

$$\kappa_I = b, \qquad \ln\eta_E = a.$$

   В замкнутом виде (МНК для N точек):

$$b = \frac{N\sum x_iy_i - \sum x_i\sum y_i}{N\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}, \quad a = \frac{\sum y_i - b\sum x_i}{N}.$$

5. Качество аппроксимации: $R^2 \geq 0.9$. Отчётно указывать единицы и способ получения $A_{\text{eff}}, \Xi_{\text{struct}}$.

16.2 Спектральная интеграция (если источник широкополосный)

При зависимости от длины волны использовать интеграл

$$\sigma_{\text{inf}} = \int \frac{R(\lambda)}{v_g(\lambda)}\,\Phi(\lambda)\,d\lambda, \qquad \Phi(\lambda) = \frac{\Xi_{\text{struct}}(\lambda)}{A_{\text{eff}}(\lambda)}.$$

Для дискретного спектра $\{\lambda_j\}$ с весами $\Delta\lambda_j$:

$$\sigma_{\text{inf}} \approx \sum_j \frac{R_j}{v_{g,j}}\frac{\Xi_{\text{struct},j}}{A_{\text{eff},j}}\,\Delta\lambda_j.$$

16.3 Замечания к точности

- Единая методика в серии для A_{eff} и Ξ_{struct} (см. §12a).
- При оценке v_g использовать дифференциальную задержку: $\Delta t = t_{\text{sample}} - t_{\text{air}}$, $n_g = 1 + \dfrac{c\,\Delta t}{d}$, $v_g = \dfrac{c}{n_g}$.
- Указывать, какая дефиниция R применена (Bm^2 или $B\log_2(1+\text{SNR})$).

17. Глоссарий (кратко)

- σ_{inf} — объёмная плотность информации (бит·м$^{-3}$) = $(R/v_g)\,\Phi$.
- R — эффективная скорость передачи информации (бит/с); proxy-оценка: $R \approx Bm^2$.
- v_g — групповая скорость (м/с).
- Φ — структурная метрика = $\Xi_{\text{struct}}/A_{\text{eff}}$ (м$^{-2}$).
- τ_{hold} — эффективное время удержания энергии.
- η_E, κ_I — параметры фита (коэф. преобразования и показатель чувствительности).

Лицензия (RU)

ЛИЦЕНЗИЯ НА ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗРАБОТКИ

Автор и обладатель прав: Профессор Никура
Контакты: https://t.me/N1KURA | n1kura@gmx.com

1. Настоящая разработка является интеллектуальной собственностью автора и охраняется международным правом.
2. Любое копирование, распространение, модификация, коммерческое или некоммерческое использование без письменного разрешения автора запрещено.
3. Запрещается патентование или регистрация разработок, основанных на данном материале, без согласия автора.
4. Исключительные права сохраняются за автором.
5. Для получения разрешения необходимо официальное письменное согласие по указанным контактам.
6. Запрещается реверс-инжиниринг, декомпиляция или обход технических ограничений разработки.
7. Нарушение условий влечёт ответственность в соответствии с международными соглашениями об авторском праве (Бернская конвенция, Договор ВОИС по авторскому праву, Соглашение TRIPS), а также национальным законодательством страны нарушителя.

© Профессор Никура. Все права защищены.

License (EN)

LICENSE FOR USE OF THE DEVELOPMENT

Author and Rights Holder: Professor Nikura
Contacts: https://t.me/N1KURA | n1kura@gmx.com

1. This development is the intellectual property of the author and is protected under international law.
2. Any copying, distribution, modification, commercial or non-commercial use without the author's written permission is prohibited.
3. Patent applications or registrations based on this material are strictly forbidden without the author's consent.
4. Exclusive rights remain with the author.
5. Permission can only be granted through an official written agreement via the provided contacts.
6. Reverse engineering, decompilation, or circumvention of technical restrictions is prohibited.
7. Violation of these terms entails liability under international copyright agreements (Berne Convention, WIPO Copyright Treaty, TRIPS Agreement), as well as the national laws of the violator's country.

© Professor Nikura. All rights reserved.